

А.И.СКИБЕНКО, канд. физ.–мат. наук,

Е.И.СКИБЕНКО, канд. физ.–мат. наук;

Ю.В.КОВТУН; Ю.В.ЛАРИН, ННЦ ХФТИ НАНУ, Харьков

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ ПЛАЗМЫ ОТРАЖАТЕЛЬНОГО РАЗРЯДА В СРЕДЕ ТЯЖЕЛЫХ ГАЗОВ И ПАРОВ МЕТАЛЛОВ

В роботі наведено опис електрофізичної експериментальної установки для дослідження властивостей багатокомпонентної плазми, яка утворюється в середовищі важких газів і парів металів за допомогою імпульсного відбивного розряду та призначена для вирішення деяких задач фізики та діагностики плазми, а також сепараційних магніто-плазмових технологій з урахуванням специфіки проведення експериментів з металевою плазмою.

The paper describes the experimental electrophysical facility for investigating the properties of the multicomponent plasma produced in the heavy gas+metallic vapor medium with the use of the pulsed reflex discharge. The facility is intended for solving some problems of plasma physics and diagnostics, and also of separating magnetoplasma technologies with due regard for the specific character of metal plasma experiments.

Общие требования к лабораторным экспериментальным плазменным установкам заключаются в относительно невысокой стоимости при возможности достижения максимальных значений по ее основным параметрам (напряженности магнитного поля, вакууму, энергетике) и возможности функционального разнообразия диагностических средств, в возможности мобильной перестройки экспериментального оборудования в зависимости от решаемых задач. С учетом этих требований проведена модернизация установки «МАКЕТ» для создания и исследования свойств многокомпонентной плазмы. Установка работает по принципу высоковольтного импульсного отражательного разряда. В число задач, решаемых на этой установке, входит исследование свойств плазмы для разработки и апробации новых диагностических СВЧ-методик.

На рис. 1 приведено ее схематическое изображение. Отдельные ее варианты и системы были частично реализованы и описаны ранее в [1-6]. Установка «МАКЕТ» (типа импульсного отражательного разряда) состоит из следующих основных частей и блоков: разрядной камеры 1, магнитной системы 2, системы вакуумной откачки 3, электродно-разрядной системы 4, системы напуска (подачи) рабочего газа (вещества) 5 и системы диагностики, включая электропитание магнитной системы 6, электро-разрядной системы 7, системы вакуумной откачки 8.

Описание разрядной камеры. Разрядная камера (1) (рис. 1) представляет собой цилиндр из нержавеющей стали X18H10T, длиной 1500 мм и внутренним диаметром 200 мм. На боковой поверхности расположен ряд патрубков Ø60 мм, предназначенных для размещения и подсоединения средств диагностики плазмы, торцевые фланцы служат для подсоединения откачного вакуумного оборудования. Кроме того, имеются патрубки для подсоединения системы напуска рабочего газа и контрольно-измерительных датчиков для измерения давления (вакуума).

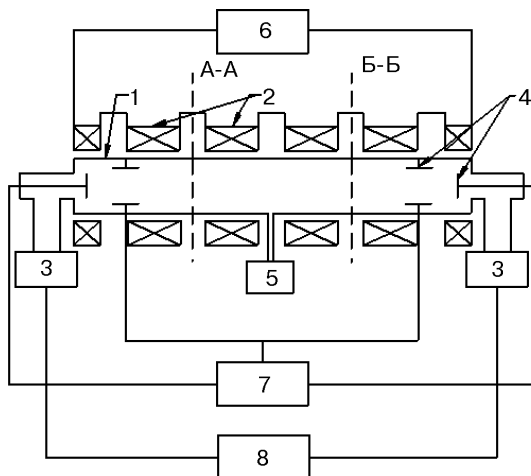


Рисунок 1 – Схематическое изображение экспериментальной установки «МАКЕТ».

1 – разрядная камера; 2 – магнитные катушки; 3 – система вакуумной откачки; 4 – электродно-разрядная система; 5 – система напуска (подачи) рабочего газа (вещества); 6 – электропитание магнитной системы; 7 – электропитание электродно-разрядной системы; 8 – электропитание системы вакуумной откачки; А-А, Б-Б – сечение диагностических портов

Описание магнитной системы (МС). Магнитное поле пробочной конфигурации формируется с помощью шести катушек – двух торцевых и четырех центральных. Основные параметры этих катушек приведены в табл. 1. Из табл. 1 видно, что для центральных катушек почти выполняется требования *F. Bitter'a* [7] относительно оптимальной формы катушек, заключающейся в том, что отношение α/β должно равняться 1,5. Но в то же время геометрия центральной катушки не совсем отвечает оптимальной согласно уточненной модели оптимизации «БКСЮ», описанной в [8]. В рамках этой модели $\alpha/\beta = 1,63$. Но выводы и одной, и другой модели идентичны: при оптимальных значениях α и β активные потери в катушке при заданном поле минимальные. Это хорошо иллюстрируется зависимостью $W_R/W_{II} = f(\alpha/\beta)$,

приведенной на рис. 2. Расхождение между реальным исполнением обмотки и оптимизированным вариантом по *Bitter* у в части активных потерь составляет ~2,0 %, а для оптимизации «БКСЮ» ~3 %, что примерно в 1,5 раза больше, чем для случая [7]. То есть для достижения минимального уровня активных потерь оптимизация должна производиться по варианту «БКСЮ».

Таблица 1

Параметры	№1 торцевая	№2 центральная
Внутренний диаметр обмотки, $2a_1$, см	23,0	23,0
Наружный диаметр обмотки, $2a_2$, см	44,0	44,0
Длина обмотки, $2b$, см	6,0	20,0
Количество витков, шт.	30	40
Количество катушек, шт.	2	4
Зазор между катушками, Δ , см	3,5	14,0
Единичная индуктивность, L , мкГн	104	360
Единичное сопротивление, R , Ом	$1,74 \cdot 10^{-3}$	$2,32 \cdot 10^{-3}$
Число $\alpha = 2a_2/2a_1$	1,91	1,91
Число $\beta = 2b/2a_1$	0,26	0,87
Отношение α/β	7,33	2,2

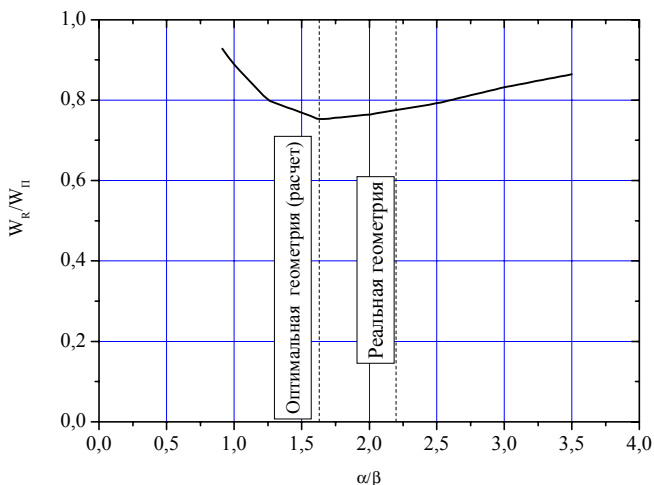


Рисунок 2 – Зависимость относительной величины активных потерь в обмотке центральной катушки при ее фиксированном объеме (весе) от отношения чисел α и β

Среди других параметров магнитной системы следует привести еще следующие: – напряжение питания МС и зарядки конденсаторной батареи 3 кВ; – длительность импульса, представляющего собой полупериод синусои-

ды ~ 18 мс; – пробочное отношение 1,25; – напряженность магнитного поля может изменяться от 1 до 9 кЭ при максимальной подводимой энергии 54 кДж. На рис. 3 – 5 в виде отношения H/H_{max} , где H_{max} – максимальное значение напряженности магнитного поля в пробке; H – значение напряженности магнитного поля в текущей координате, представлены: распределение магнитного поля по оси установки рис. 3; зависимость изменения напряженности магнитного поля во времени рис. 4; а также зависимость максимального значения магнитного поля от напряжения на емкостном накопителе рис. 5.

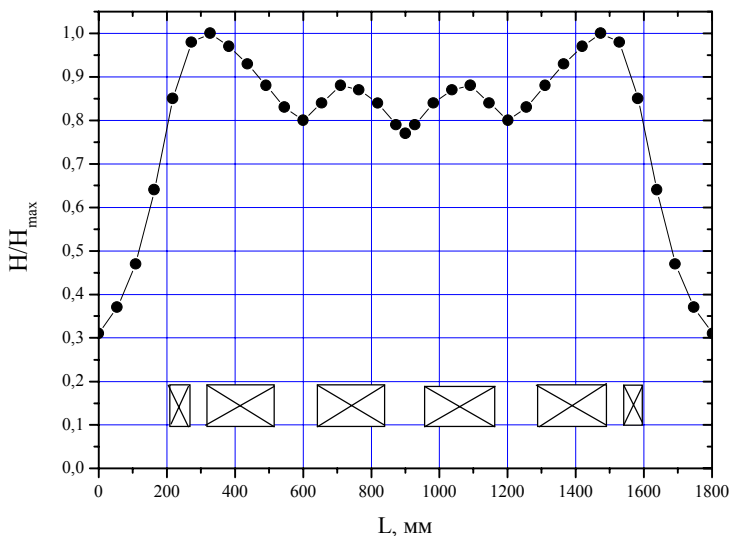


Рисунок 3 – Распределение магнитного поля по оси установки

Конструктивно обмотка единичного соленоида состоит из набора плоских алюминиевых дисков (витков) с переменным шагом, подобно [9], причем разрезы дисков смещены друг относительно друга на 60° . С учетом адиабатического интеграла (1)

$$H^2 \tau = \mu_0^2 \cdot c_1^2 \cdot a_1^2 \int_{T_1}^{T_2} \frac{c}{\rho} dT ; \quad (1)$$

$$c_1 = \eta \cdot \beta \cdot \ln \frac{\alpha + \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}}{1 + \sqrt{1 + \beta^2}} , \quad (2)$$

(где τ – длительность магнитного поля; c_1 – коэффициент формы; η – коэффициент заполнения; μ_0 – магнитная проницаемость вакуума; c и ρ – теплоемкость и удельное сопротивление материала обмотки;) интервал между импульсами был определен равным 1 мин.

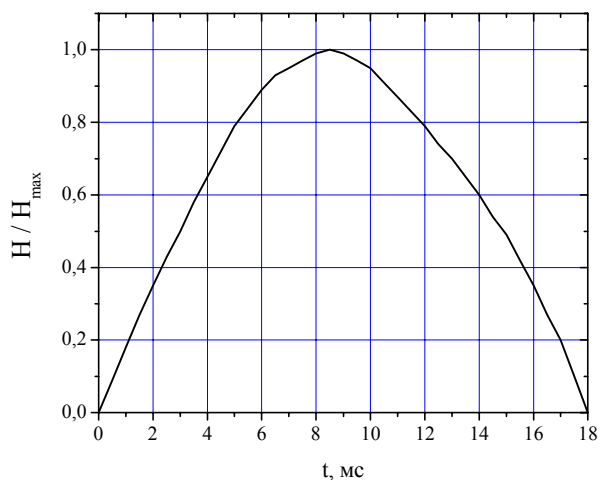


Рисунок 4 – Зависимость изменения напряженности магнитного поля во времени

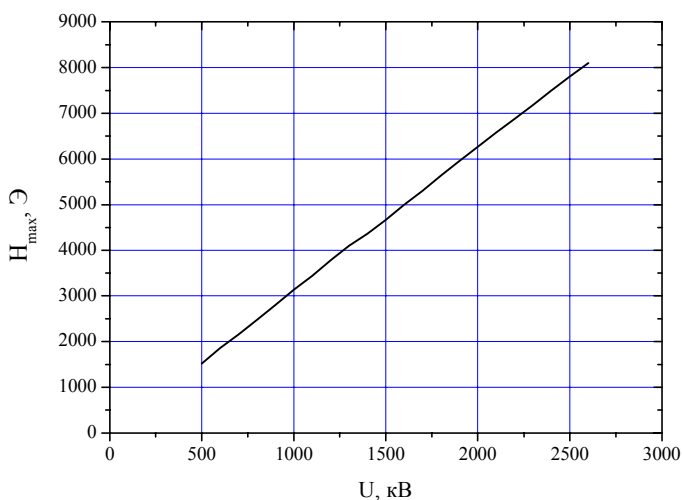


Рисунок 5 – Зависимость максимального значения магнитного поля от напряжения на емкостном накопителе.

Описание вакуумной системы. Вакуумная система состоит из двух высоковакуумных агрегатов, в состав которых входят высоковакуумные диффузионные паромасляные насосы М-500 производства опытного завода ННЦ ХФТИ НАНУ, сорбционные ловушки и форвакуумные насосы марки РВН-20 или НВР-3Д со средней быстротой откачки в диапазоне давлений 760 – 1 тор 3 л/с. Вакуумные агрегаты подсоединяются к разрядной камере

через торцевые патрубки Ø 200 мм и, соответственно, пропускной способностью 10^3 – 10^4 л/с в молекулярном и молекулярно-вязкостном режимах, 10^4 – 10^6 л/с в вязкостном [10], посредством коротких отрезков вакуумпровода Ø 100 мм. Предельное давление, полученное в объеме разрядной камеры в режиме вакуумной тренировки, составило $\sim 1 \cdot 10^{-6}$ тор.

Электродно-разрядная система. Электродно-разрядная система состоит из двух холодных катодов и двух цилиндрических дополнительных электродов, играющих роль вспомогательных анодов. Кроме того, роль анода может выполнять и корпус вакуумной (разрядной камеры). Катоды диаметром 100 мм размещаются в торцах разрядной камеры. Они выполняются либо из монометалла, например, *Al*, *Cu*, *Ti* и др., либо композитного материала, например, медь с напыленным по методу КИБ [11] титаном. Условия и режим напыления катодов в данном случае описывается следующим образом: – материал напыления – чистый *Ti*; среда напыления – *Ar* при $p = 1 \cdot 10^{-5}$ тор; – длительность напыления – до 30 мин.; техническое средство напыления – серийная установка «Булат-6» [11]; материал подложки – *Cu*; – поверхность *Cu* подложки предварительно очищалась в среде СВЧ плазмы при напуске *Ar* до $p = 2 \cdot 10^{-3}$ тор, напряжение смещения 1000 В; – покрытие поликристаллическое толщиной от 2–2,5 мкм до 5 мкм; – в процессе подготовки подложки и напыления частицы (атомы и ионы) внедряются в материал медной подложки. Затем *Ar* десорбирует из подложки. При этом титановое покрытие может частично отслаиваться в виде блистеров. На стадии распыления осажденного слоя потоками частиц и плазмы отражательного разряда блистеры испаряются, ионизируются и это способствует интенсификации процесса поступления композитного материала (например титана) в разряд, то есть этот процесс становится достаточно эффективным и может превосходить по интенсивности классический процесс поверхностного распыления монометалла. Дополнительные кольцеобразные аноды диаметром 160 мм размещались перед каждым катодом на расстоянии 100 мм и предназначены для облегчения поджига разряда, так как их стационарное положение фиксирует одинаковый размер разрядного промежутка. В случае варианта катод-анод в виде корпуса вакуумной (разрядной) камеры размер разрядного промежутка будет изменяться от включения к включению и это изменение будет определяться состоянием внутренней поверхности вакуумной (разрядной) камеры. Т.е. дополнительные аноды нужны для стабилизации процесса поджига разряда. Наличие анодно-катодной электродной системы внутри вакуумной (разрядной) камеры, как части источника плазмы, позволяет реализовать механизм создания плазмы не только из газообразного вещества, например, *H₂*, *He*, *Ar*, *Kr*, *Xe*, но из твердого вещества, например, *Ti*, *Mo*, *W*, без использования испарителя для перевода рабочего вещества из твердого состояния в парообразное для последующей его ионизации. В этом случае по-

ступление рабочего вещества в разряд осуществляется за счет корпускулярного распыления материала катода (моно – или композитного), содержащего рабочее вещество, в частности, потоками частиц и плазмы разряда, подобно [6].

Описание системы напуска (подачи) рабочего вещества. Система напуска (подачи) рабочего вещества в разрядную камеру предназначена для регулируемого напуска рабочих газов (H_2 , He , Ar , Kr , Xe) и их смесей до заданных значений давления (плотности частиц). Отметим, что напуск водорода осуществляется через палладиевый фильтр, напуск других газов (He , Ar , Kr , Xe) через механический натекаль тонкой регулировки. Контроль количества напускаемого газа осуществляется по изменению давления в ресивере или в самом реципиенте при постоянном объеме. Система напуска (подачи) снабжена запорно-регулирующей арматурой, измерителями давления в широком диапазоне его измерений.

Система диагностики плазмы. На установке «МАКЕТ» имеется 11 диагностических портов (см. рис. 6), расположенных в двух сечениях А-А и Б-Б (см. рис. 1), отстоящих на расстоянии 500 мм от торцов вакуумной (разрядной) камеры и, соответственно, на удалении 300 мм от торцевых электродов. Одна пара диагностических портов (№ 1 и 4) предназначена для интерферометрии и рефлектометрии плазмы. Для этого внутрь вакуумной (разрядной) камеры введены рупорные антенны с сечением волновода $7,2 \times 3,4$ мм, через которые можно производить зондирование плазмы в диапазоне длин волн $\lambda = 2 - 14$ мм, которые соответствуют плотности отсечки СВЧ-сигнала $n_{кр.} = 2,7 \cdot 10^{14} - 5,4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$. В портах (№ 3, 5, 7-11) размещены рупорные антенны для СВЧ рефлектометрии плазмы. В порту (№ 2) предусмотрена возможность введения диагностического средства (например, СВЧ-излучателя или электрического зонда), которое может перемещаться в радиальном направлении и изменять угол наклона. В порту №6 имеется окно для приема собственного излучения плазмы в оптическом и рентгеновском диапазоне. Кроме того, на установке имеются датчики для измерения напряженности магнитного поля, напряжения и тока разряда.

Используя приведенные методики на установке выполняются измерения следующих параметров и характеристик образуемой в разряде плазмы:

- 1 Временная зависимость средней плотности плазмы с помощью интерферометрии в диапазоне $10^{11} - 10^{14} \text{ см}^{-3}$.
- 2 Локальных значений плотности в диапазоне $5 \cdot 10^{12} - 2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ по отражению СВЧ волн при локализации плазмы обыкновенной волной $\lambda = 2 - 14$ мм и уменьшения нижнего предела плотности при зондировании необыкновенной волной [12], которая отражается в слое с плотностью

$$n_{omp.} = n_{кр.} \left(1 - \frac{\omega_{He}}{\omega} \right), \quad (3)$$

где $n_{omp.}$ – плотность отражения необыкновенной волны, ω_{He} – электронная циклотронная частота, ω – частота зондирования.

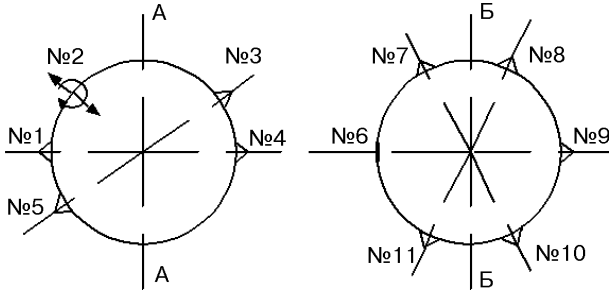


Рисунок 6 – Расположение диагностических портов и их функциональное назначение (см. по тексту)

- 3 Профиль плотности в каждом разряде по отражению одной волны и изменению средней плотности на другой частоте, а также по изменению средней плотности на разных хордах.
- 4 Динамики спектров на разных радиальных расстояниях по флуктуациям уровня отраженных волн различной частоты с последующим Фурье анализом или спектральным анализом на анализаторах типа С-27 [1].
- 5 Скорости полоидального вращения плазмы путем регистрации флуктуаций отраженных сигналов от слоев одной плотности, разнесенных в полоидальном направлении, и изучению взаимнокорреляционных функций этих сигналов, а также доплеровского сдвига частоты рефлектометра при использовании канала диагностики плазмы с подвижным излучателем для индефикации скоростей полоидального вращения волн и скорости полоидального распространения плазменных колебаний [2].
- 6 Напряженности электрического поля по величине измеренной скорости вращения плазмы с учетом радиального распределения напряженности магнитного поля [3,4].
- 7 Симметрии / асимметрии плазменного шнура путем рефлектометрии в одном сечении из разных диагностических портов.
- 8 Полного количества частиц в разряде:

$$N_{пол.} = n_{cp.} \cdot \pi \cdot a^2 \cdot l, \quad (4)$$

где a – диаметр плазменного столба, l – его длина.

Вспомогательно-обеспечивающие системы. Как следует из описания рис. 1, к ним следует отнести блоки электропитания магнитной, электро-разрядной и вакуумной систем. Блок электропитания магнитной системы состоит из: выпрямителя, состоящего из регулятора напряжения типа РНО-250/5, трансформатора ТС 10/6, вентиля КД-203Г (6 шт.), зарядного резистора (набор резисторов $R_{общ.} = 700 \text{ Ом}$, $P_{общ.} = 4 \text{ кВт}$); батареи конденсаторов типа ИМ-3-100 в количестве 120 шт. с общей емкостью 12000 мкФ зарядным напряжением до 3кВ и максимальной запасенной энергией 54 кДж, батарея состоит из 12 секций, каждая секция подключена к общей шине через предохранитель; тиристор Т9-250 (3 шт.); устройства формирования управляющего импульса тиратрона ТГИ1-35/3. Блок электропитания электро-разрядной системы содержит: выпрямитель, состоящий из регулятора напряжения типа РНО-250/5, трансформатора, вентиля Д1006 (6 шт.); накопительной емкости, состоящей из четырех конденсаторов типа ИМ-2-5-140 с общей емкостью 560 мкФ зарядным напряжением до 5 кВ и максимальной запасенной энергией 7 кДж; разрядника-игнитрона типа И-50/5000; устройства формирования управляющего импульса тиратрона ТГИ1-35/3. Разряд проходил между холодными катодами и кольцевыми анодами, соединенными с корпусом вакуумной (разрядной) камеры, через балластное сопротивление номиналом 2,8 Ом. Суммарная мощность откачных агрегатов вакуумной системы составляет 4-5 кВт.

Заключение

- 1 Электрофизическая установка «МАКЕТ» типа импульсный отражательный разряд представляет собой единый комплекс для получения многокомпонентной плазмы в среде тяжелых газов и паров металлов и исследования ее свойств посредством измерения не менее десяти физических параметров.
- 2 В табл. 2 приведены параметры плазмы, достигнутые в описываемой установке.
- 3 К конструктивно-технологическим особенностям установки отражательного разряда следует отнести следующее:
 - исполнение обмоток соленоидов магнитной системы из набора плоских алюминиевых дисков, что позволяет реализовать их безопасный тепловой режим работы при значительных длительностях импульсов магнитного поля (до 18 мс) при максимальной напряженности поля 9 кЭ;
 - возможности увеличения производительности откачных постов по меньшей мере в несколько раз, так как пропускная способность подсоединительных патрубков достигает значений $10^3\text{-}10^4 \text{ л/с}$;
 - наличие дополнительных анодных электродов значительно облегчает и стабилизирует протекание начальной фазы разряда;

Таблица 2

№	Параметры	Метод измерения	Диапазон значений
1	Средняя плотность, см ⁻³	Интерферометр $\lambda = 2$ -14 мм	$\sim 10^{14}$
2	Максимальная плотность, см ⁻³	Отсечка СВЧ волн $\lambda = 2$ -14 мм	$> 10^{14}$
3	Температура, эВ электронов/ионов	Электрический зонд	50/10
4	Уровень флуктуаций плотности, $\delta n/n$	По измерению уровня отраженных сигналов путем sin/cos детектирования	0,01–0,2
5	Напряженность электрического поля в плазме, В/см	По измерению Н и скорости вращения	2
6	Скорость вращения плазмы, см/с	По задержке ВКФ 2 ^х СВЧ сигналов разнесенных по азимуту	$2,8 \cdot 10^3$
7	Частота столкновений, с ⁻¹	По изменению затухания и фазовому сдвигу СВЧ-волны	$10^7 - 10^9$
8	Полное число частиц	$N_{\text{полн}} = 2 \cdot L \cdot \pi \cdot \int_0^r N(r) r dr$	$1 \cdot 10^{18}$
9	Профиль плотности электронов	Многочастотная рефлектометрия, интерферометрия	$n_{\text{max}} \left[1 - \left(\frac{r}{r_{\text{max}}} \right)^{\gamma} \right]$
10	Время достижения максимальной плотности, с	По изменению $N(f)$ с помощью интерферометра и отсечки СВЧ-сигнала	$2 \cdot 10^{-4}$
11	Постоянная спада плотности плазмы, с	По изменению $N(f)$ с помощью интерферометра	$2,5 \cdot 10^{-3}$
12	Градиентная длина, $n / \frac{dn}{dr}$	По изменению профиля плотности	$1,25 \cdot \text{см}$

- использование катодов монолитного и композитного состава позволяет реализовать разряды как в чисто газовой среде, так и в парометаллической.
- 4 Унитарность установки отражательного разряда делает ее достаточно удобной и эффективной для проведения исследований поискового характера и отработки новых экспериментальных методик, в том числе диагностических.

Список литературы: 1. Бакай А.С., Маслов В.И., Скибенко А.И., Солодовников Г.К. О возможности лабораторного моделирования процессов распространения электромагнитных волн в неоднородной ионосфере // Распределение электронов и физические процессы в полярной ионосфере. – Апатиты. – 1981. – С. 90-96. 2. Skibenko A.I., Berezhnyj V.L., Fomin I.P., Ocheretenko V.L., Pavlichenko O.S., Pinos I.B., Prokopenko A.V. Studies of fluctuating plasma rotation by means of correlation and Doppler microwave reflectometry // The fifth international Kharkov symposium of physics and engineering of microwaves millimeter and submillimeter waves. Symposium proceedings. – Kharkov. – V. 2. – 2004. – P. 844-846. 3. Скибенко А.И., Фомин И.П. Рефлектометрия квазистационарной плазмы частотно-модулированными электромагнитными волнами // Украинский физический журнал. – 1984. – № 11. – С. 1646-1650. 4. Скибенко А.И., Борозинец А.М., Степанов К.Н., Фомин И.П. Применение частотно-модулированных волн для рефлектометрии квазистационарной плазмы // Теплотехника высоких температур. – 1986. – Т. 24, № 3. – С. 570-574. 5. Kornienko L.A., Skibenko A.I., Voitsenya V.S., Nikolaenko A.A., Pokhodyashehiy V.I., Fomin I.P. Erosion resistance of different types of beryllium to plasma impact // Plasma devices and Operations. – 1996. – Vol. 4. – P. 306-312. 6. Скибенко А.И., Ларин Ю.В., Прокопенко А.В., Незовибатько Ю.Н., Ковтун Ю.В., Скибенко Е.И., Юферов В.Б. Создание и исследование имитационной плазмы на тяжелых газах и парах металлов в импульсном отражательном разряде для сепарационных технологий // Вестник НТУ «ХПИ». Тематический выпуск: Техника и электрофизика высоких напряжений. – 2007. – № 34. – С. 104-111. 7. Bitter F. The Design of Powerful Electromagnets Part II. The Magnetizing Coil // Review of Scientific Instruments. – 1936. – № 7. – P. 482-488. 8. Бусол Ф.И., Коваленко В.А., Скибенко Е.И., Юферов В.Б. Оптимальные параметры магнитной системы ГВЛ-2 и некоторые особенности низкотемпературных соленоидов // Физика плазмы и проблемы управляемого термоядерного синтеза. – Выпуск 4. – Киев: Наукова думка. – 1965. – С. 477-484. 9. Montgomery B.D. Magnets for field above 100kG // IEEE Transaction on Magnets. – 1966. – Vol. MAG-2, № 3. – P. 154-158. 10. Кучеренко Е.Т. Справочник по физическим основам вакуумной техники. – Киев: Вища школа, 1981. – 264 с. 11. Аксенов И.И. Вакуумная дуга в эрозийных источниках плазмы. – Харьков: ННЦ ХФТИ, 2005. – 212 с. 12. Прокопенко А.В., Скибенко А.И., Пинос И.Б. Определение положения отражательного слоя необыкновенной волны в плазме стелларатора // Вісник Харківського Національного Університету, серія фізична: Ядра, частинки, поля. – 2008. – № 794, випуск 1(37). – С. 95-99.

Поступила в редколлегию 17.09.2008.